

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Nem-hagyományos értelemben vett modern fizika a középiskolában

Baranyai Klára

Témavezető:

**Dr. Neda Zoltán egyetemi tanár
Dr. Tél Tamás egyetemi tanár**

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar**

**Fizika Doktori Iskola
Vezető: Dr. Palla László**

**Fizika Tanítása Doktori Program
Vezető: Dr. Tél Tamás**

2015.

Bevezetés

Nagyon sok olyan hétköznapi jelenség vesz körül bennünket, amelyeknek a leírására, magyarázatára csak az utóbbi időben vállalkozhatott a fizika, mert eddig nem volt meg a megfelelő fogalomrendszer, vagy esetleg hiányoztak a mérőeszközei, illetve a gyors adatfeldolgozás és a végigszámolható modellek lehetősége. Ezek a jelenségek mégsem tartoznak a középiskolai tanmenetek „modern fizika” fejezeteibe, hiszen amikor a tanmeneteink kialakultak, a tanítandó ismereteket összegyűjtötték, jóval a számítógépek elterjedése előtt, ezek még nem voltak a fizika vizsgálódásának homlokterében. A ma tanító fizikatanárok képzéséből is hiányoznak ezek a fejezetek. Ezért ezek a témák, amelyek közül nem egy tudományok határterületeire esik, rendszerint meg sem jelennek a fizikaórákon, legfeljebb földrajz-, biológia- vagy számítástechnika-órán kerülnek elő érintőlegesen mint érdekességek.

Napjainkban az iskolai természettudományos oktatás problémái egyre erőteljesebben jelentkeznek. Egyre nehezebben tudjuk az általunk elvárt szinten felkészíteni diákjainkat a rájuk váró feladatokra, akár az általános műveltség, akár a tehetséggondozás szintjére gondolunk. Fizikatanárként sokszor szembesülünk azzal, hogy a régen jól működő módszereink mostanában nem hatékonyak. Állandó oktatási reformok korát éljük, és úgy tűnik, mintha egyre kevésbé sikerülne a megfelelő eszközöket megtalálni a fizika (és a többi természettudomány) eredményes tanításához. Problémát jelent a fizika iránt nem érdeklődő gyerekek motiválása, különösen, ha nem rendelkeznek kellő matematikai alapokkal. Az is általánossá vált, hogy a nem kimagaslóan tehetséges gyerekek kevés örömet lelik a feladatmegoldásban, ami hagyományosan a fizikai gondolkodás fejlesztésének legjobban bevált terepe. A most felnövekvő generáció munkamódszereit, tanulási szokásait jelentősen megváltoztatta a virtuális világ, és ehhez nem találtuk meg a megfelelő válaszokat.

Célkitűzések

Doktori munkámban néhány olyan bennünket körülvevő, hétköznapi jelenséget jártam körül, amelyekkel a tudomány csak az utóbbi időben foglalkozott behatóbban, vagy ha foglalkozott is korábban, a téma most került az érdeklődés középpontjába. Megvizsgáltam, hogy ezek a „nem-hagyományos értelemben vett modern fizika” fejezetébe sorolható témák hogyan alkalmazhatóak a középiskolai fizikaoktatásban. Tanulmányoztam, hogy az egyes

jelenségek hogyan illeszthetők be az általános tanórák menetébe, illetve hogyan használhatóak a tehetséggondozásban. Igyekeztem olyan tanítási egységeket, modulokat létrehozni, amelyek alkalmazhatóak az órákon, szakkörökön. Ennek megfelelően a témák egy része esetén az általános és a tehetséggondozó szintnek megfelelő módszertani ajánlásokat dolgoztam ki.

A tehetséggondozásban jelentkező probléma, hogy a feladatmegoldás mellett milyen utat válasszunk a diákok ismereteinek gyarapítására, a megfelelő szemlélet kialakítására. Doktori munkám során iskolámban, a Berzsenyi Dániel Gimnáziumban kidolgoztam a tehetséggondozás projektekre épülő, önképzőköri rendszerét. Ebben a célkitűzésben az egész fizika munkaközösség együttműködött, irányításommal megteremtettük a fizika önképzőkör és tábor hagyományát. A projektmunka pedagógiai célja, hogy olyan produktumot kelljen a gyerekeknek csoportokban, kevés tanári segítséggel létrehozniuk, amelyet ők maguk is érdekesnek találnak, és közben akaratlanul is rákényszerülnek az elmélyülésre, az összefüggések mélyebb megértésére. A projektekben évről évre mindig többféle témát járunk körül, de mindig célul tűzzük ki, hogy „nem-hagyományos értelemben vett modern” jelenségek, és modern mérőeszközök is szerepeljenek a programunkban. Így mi, tanárok is új dolgokkal találkozhatunk, tanulhatunk egymástól. Meggyőződésem, hogy ezzel elérhetjük, hogy miközben a tábor kifejezetten a tehetséggondozás céljait szolgálja, a munkaközösség tagjai is sokat profitálhassanak az együttes munkából.

1. A hőterjedés jelentőségének bemutatása két környezetfizikai példán

A környezeti fizika sok olyan jelenséget kínál, amelyek bár mindennapjainkra hatással vannak, a tudomány csak mostanában kezdett el foglalkozni behatóan velük. Ezek a jelenségek általában földrajzórán kerülnek előtérbe, többnyire leíró jelleggel, vagy elnagyolt magyarázattal. Megmutatom, hogy ezek közül néhányan jobban illenek a fizikaórákhoz, ahol hagyományosan nem tárgyaljuk őket. Különösen alkalmasak a középiskolai tárgyalásra a hőterjedéshez kapcsolódó jelenségek, hiszen hétköznapi szemlélettel is megérthetőek, gyakran mégis meglepő vonásokat mutatnak.

Doktori munkám idején a hidrosztatikához hasonlóan a hőterjedés sem szerepelt az érettségi követelményei között, de a környezettudatosságra nevelés szaktárgyi alapjai közül nem hagyható ki ez a fejezet sem. Két egyszerű kísérletet mutatok be, amelyek a tengerekhez (óceánokhoz) köthetőek. Mindkét esetben didaktikailag fontos elem, hogy az eltérő

hőmérsékletű és/vagy sókoncentrációjú víz eltérő színű, így nagyon jól megfigyelhető a beinduló hőáramlás, vagy éppen a stabil rétegződés.

A tengerek melegedésének tanulmányozására egy könnyen bemutatható kísérletet ismertetek. Egy uborkásüvegben lévő vizet felül merülőforralóval melegítettünk, és a víz felszínére ételfestéket cseppentettünk. Az ételfesték a beinduló hőáramlás révén megfesti az átmelegített vízréteget, amely meglepő módon órák elteltével is csak az üveg felső részére terjed ki, és éles határréteg választja el a festetlen hideg víztől. Az összeállítással megmutatható, hogy a felülről fűtött, elég mély folyadékok hosszú idő elteltével sem melegsznek át teljesen, az átmelegített réteg vastagsága az alkalmazott fűtőteljesítménytől függ. Ezzel jól szemléltethető a környezetfizika megértéséhez szükséges egyik legfontosabb felismerés, az, hogy természetes közegeink, a víz és a levegő gyakorlatilag sohasem kerülnek termodinamikai egyensúlyba, mindig valamilyen nemegyensúlyi állapotban látjuk őket.

A magyar közoktatásban nem szokásos a termoklin zónáról beszélni, ami pedig a tengervíz elrendeződésének fontos eleme. Ez egy 50–200 méteres mélységben elhelyezkedő vékony, átmeneti réteg, amely a felszíni alacsonyabb sótartalmú és meleg (könnyű) vízréteget választja el a 3–4 km vastag, hideg és magasabb sótartalmú mélységi víztől. Az első kísérlet végülis a termoklin zóna kialakulását mutatja be uborkásüvegnyi méretben.

Az általános érdeklődésű osztályokban a termoklin zóna vizualizációját, méréssel és közvetlen tapintással történő megtapasztalását, valamint a kialakulásának megértését tűztam ki célul. Szakköri foglalkozáson a jelenség kvalitatív megértésén túl méréseket is végeztünk. Meghatároztuk az átmelegített zóna vastagságának időbeli változását. Eredményeink szerint a meleg réteg vastagsága exponenciálisan közelít az adott fűtőteljesítmény mellett kialakuló egyensúlyi értékhez. Megadom a mérés menetét és a hozzá kapcsolódó módszertani ajánlásokat.

A klímaváltozáshoz köthető fontos környezeti probléma a sarki jégtakaró olvadása. A leváló jéghegyek messze sodródnak a tengereken. A sós tengervízen úszva az 50. szélességi körig is eljutnak, ahol a tenger felszíni hőmérséklete sokkal a víz olvadáspontja felett van. Egyszerű kísérletet dolgoztam ki a jéghegyek tengervízben történő meglepően hosszú olvadásának megfigyelésére és megértésére. Jégkockák olvadását figyeltük meg tanítványaimmal azonos hőmérsékletű édes és sózott vízben. A sós vízben lényegesen tovább tart az olvadás, mert az olvadék sűrűsége kisebb a sós víznél, ezért nem indul be hőáramlás, a jég a saját hideg olvadékában úszik. Az édesvízben a sűrűbb, hideg olvadék lesüllyed, helyére melegebb vízrétegek kerülnek, ez gyorsítja az olvadást. A jelenséget jól megfigyelhetjük, ha ételfestékkel színezett jégkockákat használunk. A kísérletet kipróbáltam

különböző oktatási helyzetekben, különböző korosztályok esetén, és megkerestem bemutatásának, kiértékelésének a korosztályhoz legjobban illeszkedő módját.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [1], [7].

2. Kilökődési jelenségek vizsgálata

A komplex jelenségeknek a diákok számára vonzó osztályát alkotják az időbeli szabályszerűséget mutató kilökődési folyamatok, mint például a nagy skálán megfigyelhető geizírműködés, vagy kis skálán a kávéfőző és a gyertyahajtású kishajó pőfögése. Megmutatom, hogy ezeknek a látszólag egymástól távol álló jelenségeknek az együttes és egymásra épülő tárgyalása nemcsak élvezetes a diákok számára, hanem a jelenség lényegének a jobb megértését is szolgálja.

A vízzel teli csövek egy ponton, állandó fűtőteljesítménnyel történő melegítése a csőből a víz kváziperiodikus kilökődéseit eredményezi. A mindennapi élet e három területének együttes tárgyalásával a humán érdeklődésű osztályokban is jól használható tanítási modult dolgoztam ki. A jelenségek megértése alapszinten nem tartalmaz számításokat, mégis, komplexitásukkal lehetőséget adnak a fizikai gondolkodás elmélyítésére.

Sok háztartásban megtalálható a filteres („amerikai”) kávéfőző, melyben egy kancsó tetejére helyezett papírfilterben lévő kávéőrleményen csöpög át a víz, így készítünk vele kávé. A szerkezet működésének megfigyelésére diákjaimmal szakköri foglalkozáson hajlított üvegcsövekből és üvegtölcsérből álló modellt építettem. A modell nemcsak a folyamat megértésében segít azáltal, hogy a szemünk előtt játszódik le a jelenség, de módot ad különböző mérések elvégzésére is. A mérésekből nyert adatok további feldolgozásával a következő tézis foglalkozik.

A gyertyahajtású kishajó a mechanika irányába kínál kitekintést. Sok gyerek ismeri ezt a játékszert, de a működését csak a kávéfőző működésének kielemezése után érti meg alaposabban.

A geizírek működése a három jelenség közül a legkomplexebb. Mivel a forráspont nyomásfüggése, valamint a geotermikus gradiens is szerepet játszik a jelenségben, ennek iskolai modellezése csak részben valósítható meg, de így is nagyon tanulságos.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: [5].

3. A kilöködés modellezése, számítógépes szimulációja

A kávéfőzőmodell működése felvetette az esetleges kaotikus viselkedés lehetőségét. Az is felmerült, hogy a kilökődések hossza, ideje nem mutat-e hatványeloszlást, mint például a földrengések. Méréseket végeztem és statisztikát készítettem a kilökődések hosszáról, a kilökött víz mennyiségéről, és a kilökődések között eltelt úgynevezett melegedési időről. A három mennyiség exponenciális eloszlást mutatott.

Ennek értelmezésére Néda Zoltán témavezetőmmel egy dinamikai modellt állítottam fel, amelyre számítógépes szimulációt készítettem. A forrást a gőzbuborékok lökésszerű képződésével modelleztem, amit úgy értelmezhetünk, hogy a vízoszlopot időnként alulról induló, különböző nagyságú lökések érik. Ezek hatására a vízoszlop megemelkedik, és vagy visszazuhan, vagy egy része kilökődik a csőből. Megmutattuk, hogy a szimulációval kapott eredmények szerint a kilökődések hossza, a kilökött víz mennyisége, és a melegedési idők jó közelítéssel követik a mérési eredményeket, exponenciális eloszlást mutatnak.

A méréseket a diákokkal együtt végeztük. A modell felállítása és a számítógépes szimuláció elkészítése túlmutatott a középiskolai kereteken, de a modell megértése, a szimuláció futtatása, az eredményeinek a mérésekkel történő összevetése a diákokkal közösen történt.

A tézishoz kapcsolódó publikáció: [5].

4. Folyadékfizika a tehetséggyondozásban

A tehetséggyondozásban jól használható jelenségkörnek bizonyulnak a folyadékfizikai folyamatok. Megmutattam, hogy erre különösen alkalmas a középiskolai tananyagon kívül eső hidraulikus ugrás tanulmányozása.

Bár a hidrosztatika és –dinamika hosszabb ideig háttérbe szorult a középiskolai tantervekben, a legtöbb tanár a fontossága és gyakorlati alkalmazhatósága miatt időt szentel ezekre a fejezetekre is. Ezen témakörben egy egyszerűen kivitelezhető, újszerű kísérletet mutatok be. Egy közepen kicsit behorpasztott (réz)korongot a mosogató medencéjében vízszög alá helyezünk. Meglepő módon azt tapasztaljuk, hogy a korong lebegni kezd a víz felszínén, és felületén a hidraulikus ugrás is megjelenik. A kísérlet lehetőséget kínál arra, hogy

a középiskolában megismerhessék a diákok a hidraulikus ugrás jelenségét, amely sokszor előfordul a környezetünkben, de csak nemrég lett széleskörűen fizikai kutatás tárgya.

A kísérletet kipróbáltam általános és humán érdeklődésű osztályban, ahol meglepő volta miatt alkalmasnak bizonyult a figyelem felkeltésére. Ezekben a csoportokban megálltunk a jelenségértelmezés szintjén. A tehetséggondozás számára a kísérlet több mélységet kínál. A diákjaimmal, szakköri keretek között méréseket, számításokat és becsléseket végeztem. Egyszerű modellt találtam, amely középiskolás szinten mutat rá arra, hogy a folyadék sűrűlódása milyen szerepet játszik a hidraulikus ugrás bekövetkezésében egy állandó keresztmetszetű áramlási cső esetén.

A rézlemez a nyugvó vízfelszínen is fennmarad. Ennek kapcsán rámutatok arra a tanítási gyakorlatban általánosan elterjedt tévedésre, amely szerint a korongot kizárólag a felületi feszültség tartja a vízfelszínen.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [3], [6] .

5. Önszerveződés és lavinák a szakköri munkában

A lavinák kialakulásának megértése, modellezése is az utóbbi 30-40 évben lett a fizikai kutatások aktív tárgya. A jelenségekört a kutatók önszerveződő kritikusság gyűjtőnéven emlegetik. Megvizsgáltam, hogy a lavinákat leíró homokdomb-modell hogyan vihető be a középiskolai fizikatanítás keretei közé. Megmutattam, hogy a diákok nagyon vonzóknak találják, hogy egy bonyolultnak és félelmetesnek tűnő természeti jelenséget egyszerű modellre épülő számítógépes program segítségével hatékonyan megérthetnek.

A homokdomb-modellben a négyzetrácsosan felosztott négyzet alakú „hómezőre” véletlenszerűen hullanak a hópelyhek. Ha valahol túl magas hókupac keletkezik, a kupac megcsúszik. A modell szerint, ha egy rácspontra már négy hópihe hullott, akkor a rácspontból a hópihék mindegyike átadódik a szomszédos négy rácspont egyikének. Így a szomszédos rácspontokban eggyel megnő a hópihék száma, míg az illető rácspont kiürül. Ha valamelyik szomszéd rácspont ezáltal „megtelik”, akkor onnan is továbbadódnak a hópihék, és így tovább. Így időről időre a megcsúszások hosszabb láncolatai, úgynevezett lavinák alakulhatnak ki. A hómező széléről a továbbadott hópihék szintén lavinaszerűen (kisebb nagyobb mennyiségekben) lehullanak és elvesznek.

A modell nem igényel mélyebb előismereteket, a működés mechanizmusa könnyen megérthető. A tapasztalat szerint a számítógépes szimuláció programozása sem jelent túl

nehéz feladatot a számítástechnikát emelt szinten tanuló diákok számára. A tehetséggondozásban projektmunka keretében foglalkoztunk két diákkal a modellel. Önállóan áttanulmányozták a kijelölt szakirodalmat, majd közös konzultációt követően önálló programot írtunk. A program megjelenítette a rácspontokat, színkóddal jelezte a hópihék számát egy-egy helyen, így jól láthatóvá váltak a kialakuló lavinák. Emellett a program statisztikát is készített a kialakuló lavinák hosszának eloszlásáról. Így mód nyílt a tudományok egyre több területén felbukkanó hatványeloszlás megismertetésére is.

A műszaki és természettudományos pályára készülő diákok választás előtt állnak, a matematikán kívül egy szakirányú érettségi tárgyat kell megjelölniük, ami általában vagy a fizika vagy az informatika, de idő hiányában mindkettőt nem választják, pedig a további tanulmányaik során mindkét tárgyból emelt szintű ismereteket várnak el tőlük. A homokdomb-modell tanulmányozása azért is lehet eredményes a középiskolában, mert olyan példát mutat a két terület összekapcsolására, amelyben a fizikai valóság megértésének valódi eszköze a számítógépes szimuláció. Izgalmas problémának bizonyult, ami az önálló alkotás és kutatás élményét nyújtotta a diákok számára.

6. Hőkamera a fizikatanításban

Napjaink egyik széles körben alkalmazott modern és izgalmas mérőeszköze a hőkamera. Doktori munkámban megmutattam, hogy ez az eszköz jól alkalmazható a fizikatanításban.

Egy tizenegyedikes diákcsoporttal három napon át készíthettünk felvételeket egy projekt keretében. Olyan kísérleteket végeztünk el, és vizsgáltunk meg a kamerával, amelyek már korábban megtanult törvényeket támasztottak alá. Eközben a szokásos tananyagban nem szereplő hővezetési és hőkiegyenlítődési jelenségekkel is megismerkedhettünk. A vizsgált folyamatok nagy részében a hőmérsékletváltozás rövid idő alatt, vagy nagyon kis helyen játszódik le, hagyományos hőmérővel nagyon körülményes a kimutatása. Az érzékeny hőkamera lehetőséget adott arra, hogy az elvont fogalmakkal történő leírás mellett láthatóvá is tegyük a hőmérsékletváltozást. Ez különös élményt jelentett mindannyiunk számára. Megvizsgáltuk a mechanikai munka hővé alakulásának néhány példáját, a gázok állapotváltozásait kísérő hőmérsékletváltozásokat, a Joule-féle hő képződését, hőterjedési és hőoptikai jelenségeket. A diákokkal a három nap elteltével még hosszan dolgoztunk, rendszereztük az elkészült felvételeket, magyarázó szövegeket írtunk hozzájuk, és egy

nyilvános honlapot készítettünk. Ezzel olyan digitális szemléltetőanyagot hoztunk létre, amit kollégáimmal azóta is rendszeresen használunk, és más iskolák tanárai is beépíthetik az óráikba.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [4], [7].

7. Fizikatábor

A tehetséggondozás régi, jól bevált formája a feladatmegoldó szakkör. Tapasztalataim szerint az átlagos tehetségű diákok számára sokszor mégsem nyújt kellő motivációt, még akkor sem, ha műszaki pályára készülő gyerekekről van szó. Fizika munkaközösség-vezetőként projektmunkára épülő programot dolgoztam ki, amelyben kisebb csoportokban tanári irányítás mellett, mégis önállóan, különböző témákkal foglalkoznak a gyerekek.

A tanévben elhúzódó program megvalósításában a hét fős munkaközösség minden tagja részt vesz. A csoportok munkáját támogató kollégákat arra ösztönzöm, hogy olyan, a szoros tananyagon túlmutató témát találjanak, amely nemcsak a gyerekeknek, hanem a tanároknak is újdonság, hiszen így a gyerekekkel együtt a tanárok is átélik a megismerés és az alkotás örömét. A mára hagyománnyá vált tanév végi fizikatáborral sikerült olyan célt tűzni a gyerekek elé, ami kellően motiválja őket, hajlandóak elmélyülni a témájukban, presztízskérdéssé válik számukra, hogy a kiválasztott problémát alaposan körüljárják, érdekes kísérleteket, méréseket végezzenek, új ismeretekre tegyenek szert, és azokról a többieknek is beszámoljanak. A táborban a diákok bemutatói mellett különböző mérések, egyéni és csoportos feladatmegoldás, esti előadások, távcsöves észlelés képezi a szakmai programot, melynek fontosabb elemeit részletesen ismertetem. Megmutatom, hogy a projektmunka és a tábor keretében lehetséges a diákok számára olyan megfelelő nehézségű, érdekes feladatot találni, melynek kapcsán az alkotás élménye megerősíti bennük a tehetségük kibontakoztatása iránti elkötelezettségüket is.

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [1], [2], [3], [6].

Összegzés, jövőbeli tervek

Doktori munkámban megvizsgáltam, hogy a középiskolai fizikatanításban hogyan használhatóak olyan jelenségek, amelyek az utóbbi évtizedekben kerültek a fizika érdeklődésének középpontjába. Ezek sokszor a bennünket körülvevő, mindennapi élet jelenségei, ezért tapasztalataim szerint még a humán érdeklődésű osztályokban is alkalmas a figyelem felkeltésére. A fizika iránt érdeklődő diákok számára pedig ezek az érdekes jelenségek lehetőséget adnak mérésekre, modellalkotásra, számítógépes szimulációra, ezért nagyon jó terepet jelentenek a projektmunkán alapuló tehetséggondozásra. Jövőbeli terveim között szerepel, hogy a kipróbált jelenségek körét bővítem, hiszen a nem hagyományos modern fizikához kapcsolódó jelenségek köre igen széles. Az egyes témákhoz feladatlapot, tanári segédanyagot készítek, hogy kész modulokként bekerülhessenek a fizikatanári eszköztárba.

A fizika önképzőkör és a tábor megszervezésével iskolámban sikerült a tehetséggondozás céljainak megfelelő formát megtalálni. Projektmunkájával több diákunk szerepelt különböző versenyeken, ahol sikereket értek el. Az önképzőkör és a tábor szervezéséhez az iskola vezetésétől munkaközösség-vezetőként kellő támogatást kapok, a tábor bekerült az iskola pedagógiai programjába is. Az évről évre megújuló program minden évben újabb és újabb témák felkutatását kívánja, ezért a fizika munkaközösség tagjainak együttműködése, lelkesedése, nyitottsága nélkül elképzelhetetlen a közös munka további folytatása. A tábor megszervezéséhez minden évben pályázati lehetőségeket keresünk. Reményeim szerint az iskolában mind a személyi, mind az anyagi feltételei megmaradnak az önképzőköri és tábori tehetséggondozás folytatásának.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk:

1. *Baranyai K.*: Olvadó jéghegyek, melegedő tengerek, Fizikai Szemle, 2013. július-augusztus, 267-269. o.
2. *Baranyai K.*: Földrajzi helymeghatározás a Nap segítségével Fizikai Szemle, 2009. április, 147-149.o.
3. *Baranyai K.*: Vízen lebegő rézlemez, Fizikai Szemle, 2015. április, 131-134.o.
4. *Baranyai K.*: Thermo-cam at Topic Week, Physics Competitions Vol 13. no 1 2011., 38-48.o.
5. *Baranyai K.*: Nem-hagyományos értelemben vett modern fizika a középiskolában, in: Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen ELTE Fizika Doktori Iskola, szerk. Juhász A.,Tél T., Budapest, 2009. , 275-280.o.
6. *Izsa É.,Baranyai K.*: Kísérletek a fizikatórban, in:Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan ELTE Fizika Doktori Iskola, szerk.: Tasnádi P., Budapest, 2011., 404-409. o.
7. <https://sites.google.com/a/berzsenyi.hu/hokamera/>